

# 第1章 現代の環境工学

## 1.1 環境工学の特徴

環境工学は、歴史的には土木工学の一分野である「衛生工学」から発展してきた分野である。衛生工学は「生（いのち）」を「衛る（まもる）」工学として、都市化に伴って顕在化した感染症の予防や公衆衛生の確保を目的とし、上下水道の整備やごみ処理施設の設計などを担ってきた。こうした人間の健康と安全に関わる課題への対応を出発点としつつ、やがて生態系の劣化や地球温暖化といった地球規模の問題が加わり、「環境工学」は、現在では持続可能な社会の構築を支える中核的工学分野として位置づけられている。

環境工学が対象とするのは、生命・生活・自然環境に関わる多様な問題の発生を予測し、それを予防・解決するための技術的・制度的な体系である。様々な環境指標とその意味を理解した上で、現象を定量的に解明し、問題を評価・制御・改善していく。そこには自然科学的な知見に加えて、歴史的・社会的・制度的な背景を踏まえたシステムとしての環境理解も不可欠である。

とりわけ SDGs（持続可能な開発目標）が2015年に国際的に合意されて以来、環境問題の解決には社会を構成する全ての主体、国や自治体といった公的機関のみならず、企業、市民、NPO/NGO がそれぞれの立場から関与する必要があるといった認識が広まっており、こうした視点も環境工学の学びや研究において重視されるものである。

このように、細胞レベルから地球規模の環境・社会システムに至るまで、幅広いスケールを対象にし、科学・技術・社会制度を統合的にとらえる視点を必要とする点は、環境工学の特徴である。また、こうした学習でよい未来の社会を創出する力を養うことができる点は、環境工学を学ぶ意義の一つと言える。

## 1.2 本書の内容

本書は、12の章で構成されており、大きく3つのパートで構成されている（図1.1）。第1章から「基礎的な科学と持続可能な社会に向けたアプローチを学ぶ（パート1）」、「環境問題の指標、技術と問題解決方法を学ぶ（パート2）」、「知識を統合した生活や政策の提案を考える（パート3）」と環境問題の解決に向けた知識から実践へと学習をつなげている。

以上のように本書の特徴は、専門的な知識を個別に解説するだけでなく、それらが私たちの暮らしや未来の社会づくりとつながっているのかを網羅し“ぜんぶわかる”ように丁寧に解説している点にある。読者には、本書を環境工学の学びの幹として活用し、その全体像を俯瞰しながら、複雑な問題に対する多角的な視点と統合的な理解を身につけていただきたい。

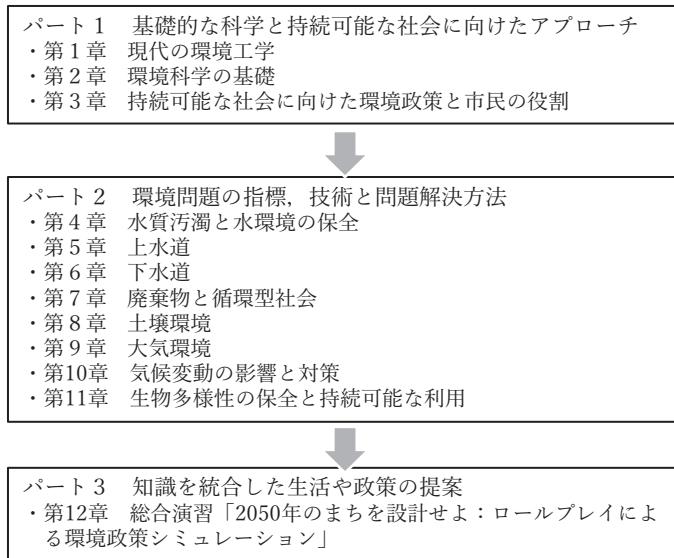


図 1.1 本書の全体構成

## 第2章 環境科学の基礎

### 【本章で学ぶこと】

環境工学を理解し、環境問題を検討していくためには、環境化学、環境物理、環境生物の基礎的知識が必須である。ここでは、これらについて整理したが、他の参考書を参考にしてより深い知識を身につけてくれることを期待する。また、環境問題に取り組む態度の基本としてますます重要になるであろう環境リスクについても紹介する。

### 2.1 環境化学の基礎

#### 2.1.1 物質の状態変化

物質は、分子間に働く力の大きさと分子自身の運動力の大きさによってその状態を変化させる。水の場合、氷（固体）を加熱すると水（液体）になり、これを融解（その逆を凝固）といい、さらに加熱すると水は水蒸気（气体）に変化し、これを気化（その逆を凝縮）という。また、ドライアイス（固体）は直接气体（二酸化炭素）になるが、この固体から气体へ、あるいは气体から固体の状態変化を昇華という。

図2.1は水の状態変化を示したものである<sup>1)</sup>。水は分子間に働く水素結合により他の物質に比べて潜熱が大きく、蒸発し難いという性質を持つ。潜熱のうち、氷から水への融点では融解熱、水から水蒸気の沸点では気化熱といい、気化熱は融解熱より大きな熱量を必要とする。

#### 2.1.2 気体の全圧と分圧

気体の体積は絶対温度に比例し、圧力に反比例する。これをBoyle-Charles（ボイル・シャルル）の法則という。絶対温度  $T_1$ 、圧力  $P_1$  の気体の体積  $V_1$  が、絶対温度を  $T_2$ 、圧力を  $P_2$  に変化させて  $V_2$  になったとき、式(2.1)の関係式が成立する。

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \text{定数} \quad (2.1)$$

標準状態（0°C、1気圧）における定数は、

$$\begin{aligned} \text{定数} &= \frac{1.013 \times 10^2 (\text{kPa}) \times 22.4 (\text{L/mol}) \times n(\text{mol})}{273(\text{K})} \\ &= 8.31 \times n (\text{L} \cdot \text{kPa}/\text{K}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

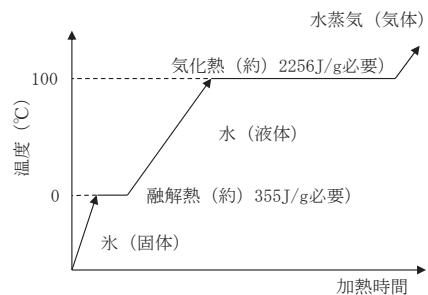


図2.1 水の状態変化<sup>1)</sup>

潜熱：物質が状態変化する際に温度変化を伴わずに吸収したり放出したりする熱のこと。

となり、 $8.31L \cdot kPa/mol \cdot K$  を  $R$  (気体定数) で表すと式 (2.3) となる。この式を気体の状態方程式という。

$$PV = nRT \quad (2.3)$$

混合気体の圧力は全圧といい、各成分気体の分圧の総和である。 $n_A$  (mol) の気体 A と  $n_B$  (mol) の気体 B からなる混合気体の各々の分圧を  $P_A$ ,  $P_B$  とすると、全圧  $P$  は、

$$P = P_A + P_B \quad (2.4)$$

また、気体 A の分圧  $P_A$  は、式 (2.5) のようにモル分率 × 全圧で表される。

$$P_A = \frac{n_A}{n_A + n_B} \times P \quad (2.5)$$

### 2.1.3 溶液濃度と溶解度

溶液の濃度は、溶液中の溶質の存在量の割合を示すものである。濃度の表し方には、溶質の質量比を表す質量パーセント濃度（体積比を表す場合は体積パーセント濃度）や、溶液 1L 中に含まれる溶質の質量 (mg/L), あるいはモル数 (モル濃度) などで表される。

図 2.2 は溶解度曲線を示したものである<sup>2)</sup>。溶解度を上げるには一般に水温を高くすればよいが、塩化ナトリウムのように温度上昇に無関係な物質もある。表 2.1 に気体の水に対する溶解度を示す<sup>1)</sup>。気体の水への溶解度は温度が低いほど大きく、また、温度が一定の場合、式 (2.6) に示すように溶媒に溶ける気体 A の濃度  $C_A$  はその気体の分圧  $P_A$  に比例する。これを Henry (ヘンリー) の法則といい、 $k$  は溶質、溶媒、温度に依存する定数である。なお、酸素の水中への溶解度は 20°Cにおいて 0.0314L/L (1 気圧時) であり、空気中の酸素分圧を 21% として酸素の体積を質量に換算すると 8.8mg/L となる。

$$C_A = kP_A \quad (2.6)$$

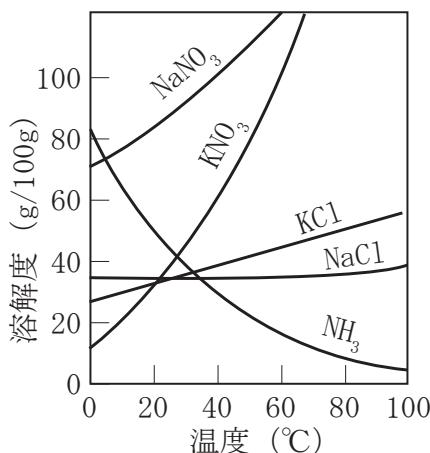


図 2.2 化合物の溶解度曲線<sup>2)</sup>

表 2.1 気体の水への溶解度<sup>1)</sup>

気体	0 °C	25 °C
水素	0.0214	0.0175
酸素	0.0489	0.0283
窒素	0.0235	0.0143
二酸化炭素	1.713	0.759
アンモニア	1299	635

(注) 1気圧における水 1L に溶ける気体の体積 (L)

分圧：混合気体を構成する複数の気体それぞれが、他成分を取り除いて、それだけで全体積を占めたと仮定したときの圧力を、その成分気体の分圧といいう。

溶解度：100g の溶媒に溶ける溶質の最大量のこと

### 2.1.4 化学平衡

化学反応の速さは、反応する物質の濃度に比例する。反応物 A と B から生成物 C が生じるとき、その反応速度 V は A と B のモル濃度に比例して速くなる。

$$A + B \rightarrow C \text{ の反応速度は } V = k \times [A] \times [B] \quad (2.7)$$

反応物 A と B から生成物 C と D が生成されるとき、生成反応（正反応）と同時にその逆の反応（逆反応）が生じる。正反応と逆反応の反応速度が同一になり、反応が停止したようにみえる状態を化学平衡という。

正反応



逆反応

正反応の反応速度  $V_1$  ( $=k_1[A]^a[B]^b$ ) と、逆反応の反応速度  $V_2$  ( $=k_2[C]^c[D]^d$ ) が平衡状態 ( $V_1=V_2$ ) にあるとき、式 (2.9) が成り立つ。ここで、k は平衡定数といい、各成分の濃度の積の比は一定である（質量作用の法則）。

$$\frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} = \frac{k_1}{k_2} = k \quad (2.9)$$

例えば、水酸化カルシウム ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) の水溶液中では、以下の反応が考えられる。



平衡状態での平衡定数は式 (2.11) のように表され、飽和溶液では  $[\text{Ca(OH)}_2]$  は一定であるため、平衡式は式 (2.12) のように変換される。

$$k = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{OH}^-]^2}{[\text{Ca(OH)}_2]} \quad (2.11)$$

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = k[\text{Ca(OH)}_2] = K_{sp} \quad (2.12)$$

定数  $K_{sp}$  は塩の溶解度積と呼ばれ、水中のイオン濃度を比べることにより沈殿物の生成の有無が判断できる。すなわち、 $[\text{Ca}^{2+}][\text{OH}^-]^2 > K_{sp}$  であれば、平衡状態に達すると沈殿物が生成することになる。**表 2.2** に金属水酸化物の溶解度積の例を示す<sup>2)</sup>。

表 2.2 金属水酸化物の溶解度積<sup>2)</sup>

(mol/L) <sup>2</sup> (mol/L) <sup>3</sup> など値数によって単位は異なる			
水酸化物	$K_{sp}$	水酸化物	$K_{sp}$
$\text{Al(OH)}_3$	$1 \times 10^{-33}$	$\text{Fe(OH)}_3$	$1 \times 10^{-33}$
$\text{Ca(OH)}_2$	$8 \times 10^{-6}$	$\text{Mg(OH)}_2$	$6 \times 10^{-12}$
$\text{Cd(OH)}_2$	$1 \times 10^{-14}$	$\text{Mn(OH)}_2$	$1 \times 10^{-14}$
$\text{Co(OH)}_2$	$2 \times 10^{-16}$	$\text{Ni(OH)}_2$	$1 \times 10^{-14}$
$\text{Cr(OH)}_3$	$1 \times 10^{-30}$	$\text{Pb(OH)}_2$	$1 \times 10^{-16}$
$\text{Cu(OH)}_2$	$6 \times 10^{-20}$	$\text{Sn(OH)}_2$	$1 \times 10^{-26}$
$\text{Fe(OH)}_2$	$1 \times 10^{-15}$	$\text{Zn(OH)}_2$	$1 \times 10^{-17}$

### 2.1.5 酸と塩基

#### a. 水のイオン積

水はごくわずかであるが以下のように解離する。



$$K_w = \frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} \quad (2.14)$$

平衡式で  $[\text{H}_2\text{O}]$  の変化は極めて少ないので、上式は以下のように書き換えることができ、

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_w [\text{H}_2\text{O}] = K_w \quad (2.15)$$

ここで、25°Cのとき  $K_w$  はほぼ  $1 \times 10^{-14}$  である。

#### b. pH

pHは水溶液中の水素イオン濃度の度合いを表した指標であり、次式のように水素イオン濃度の逆数の常用対数で定義されている。

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (2.16)$$

水素イオン濃度が  $1 \times 10^{-7}\text{mol/l}$  よりも大きければ (pH < 7) その水溶液は酸性、 $1 \times 10^{-7}\text{mol/l}$  よりも小さければ (pH > 7) その水溶液はアルカリ性と呼ぶ。

#### c. 酸の解離

酸や塩基の強さは電離平衡の定数である酸解離定数  $K_a$  の大きさによって決まる。例えば酢酸は、



のように電離するが、その酸解離定数は、

$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} = 1.75 \times 10^{-5} \quad (2.18)$$

となる。表2.3に様々な酸や塩基の  $K_a$  の逆数の常用対数の値を示す<sup>3)</sup>。

塩酸や硫酸、硝酸などは  $\text{p}K_a$  が2以下と非常に小さく、その溶液中ではほとんどが解離しており(解離度が1に近く)，強酸といえる。一方、炭酸や酢酸、フェノールなどは  $\text{p}K_a$  の値は7に近い高い値で、弱酸とされている。

**酸と塩基**：塩酸や硝酸、硫酸など、解離して水素イオン ( $\text{H}^+$ 、プロトンとも呼ぶ) を放出する物質のことを Brønsted (ブレンステッド) によって酸と定義されている。逆に、プロトンを受容する物質のことを塩基と呼び、それらの物質は水の解離を考慮すると水酸化物イオン ( $\text{OH}^-$ ) を放出するようにもみえる。また、酸がプロトンを放出すれば塩基に、塩基にプロトンが結合すれば酸になる。

**解離と電離**：解離とは物質がその成分原子、イオン、原子団などに可逆的に分解する反応のこと、電離とは解離の中でも水溶液中などで電解質がイオンに解離する場合をいう。

**pH**：水素イオン指数を pH (Potential Hydrogen、Power of Hydrogen の略) という記号で表し、酸性やアルカリ性の度合いを示す数値である。1909年にデンマークの生化学者セレン・セーレンセンにより提唱された。

表 2.3 水溶液中の酸解離定数<sup>3)</sup>

酸の種類	化学式	pK <sub>a</sub>
塩酸	HCl	- 8
硫酸	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	(1) << - 10, (2) 1.99
硝酸	HNO <sub>3</sub>	<< - 10
リン酸	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	(1) 2.15, (2) 7.20, (3) 12.35
炭酸	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	(1) 6.35, (2) 10.33
酢酸	CH <sub>3</sub> COOH	4.74
フェノール	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	9.82
アンモニウムイオン	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	9.35

注：(1), (2), (3)などはそれぞれ、第1段、第2段、第3段の解離を示す

#### d. 緩衝溶液

酸やアルカリを少しくらい加えても水素イオン濃度（もしくはpH）の変わりにくい溶液のことを緩衝溶液（Buffer Solution）と呼ぶ。例えば、酢酸の溶液にその共役塩基（酸からプロトンが解離したもの）である酢酸イオンを含む酢酸ナトリウムなどを入れると緩衝溶液ができる。酢酸と酢酸ナトリウムの混合水溶液中では、酢酸はほとんど電離しないため酢酸として存在し、酢酸ナトリウムはほぼ完全に電離するため、酢酸イオンとして存在する。式(2.19)において、酢酸と酢酸ナトリウムを同じ濃度で等量混合すると、そのpHはpK<sub>a</sub>近くの4.74になることがわかる。

$$[\text{H}^+] = \frac{[\text{CH}_3\text{COOH}]}{[\text{CH}_3\text{COO}^-]} \times K_a \quad (2.19)$$

この混合水溶液において、新たにH<sup>+</sup>を加えても多量に存在する酢酸イオンを結合して酢酸になり、また、OH<sup>-</sup>が加えられた場合は酢酸と結合してH<sub>2</sub>Oを生成することになり、pHはほとんど変化しない。また、酢酸の他に、リン酸やアンモニアの緩衝溶液などは水溶液のpH調整に広く用いられている。

#### 2.1.6 酸化と還元

銅は以下の反応で酸化される。



銅の電荷は0(Cu<sup>0</sup>) → +2(Cu<sup>2+</sup>)に増加して電子を失い、これを酸化という。逆に、酸素は電荷を獲得し、電子は0(O<sub>2</sub>) → -2(O<sup>2-</sup>)に減少する。これを還元という。このように、酸化と還元の反応は常に同時に進行する。

例えば、下水管の腐食は硫黄の酸化と還元の作用によって生じる。下水管底部の下水中には硫酸化物(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)が含まれ、この硫酸イオンが硫化水素(H<sub>2</sub>S)に還元され、気化し下水管内側上部で酸化され硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)に変化してコンクリートの下水管を腐食させている。Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>からH<sub>2</sub>SへのSの電荷は+6 → -2に減少(還元)し、またH<sub>2</sub>SからH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>へのSの電荷は-2 → +6に増加(酸化)していることから、腐食の原因是、硫酸還元細菌と硫黄酸化細菌による硫黄の変換によるものであることがわかる。

**酸化剤と還元剤**：相手の物質を酸化し、それ自身は還元される物質を酸化剤といい、塩素(Cl<sub>2</sub>)、オゾン(O<sub>3</sub>)、過マンガン酸カリウム(KMnO<sub>4</sub>)などがある。逆に、相手の物質を還元し、それ自身は酸化される物質を還元剤といい、硫酸鉄(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O)、亜硫酸ナトリウム(Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)などがある。

### 2.1.7 反応の形態

化学反応の形態やその反応速度を定量的に表すことは、反応装置の設計や操作において特に重要である。実際は、pH や温度などの環境因子や微生物の性状などによって反応速度は影響を受ける。ここでは、反応速度の基礎を知る上で 0 次反応、一次反応、連続反応について述べる。

#### a. 0 次反応

反応速度が反応物の濃度に依存せずに一定であるとき、その反応物の反応速度（時間  $t$  における濃度  $C$  の減少速度）は式 (2.21) のように表すことができる。なお  $k$  は反応速度定数である。

$$\frac{dC}{dt} = -k \quad (2.21)$$

時間  $t=0$  の時の反応物の初期濃度を  $C_0$  として積分すると次式となる。

$$C = C_0 - kt \quad (2.22)$$

#### b. 1 次反応

反応物 A から生成物 B への反応で、その反応速度が反応物の濃度に比例する場合、式 (2.23) となる。

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (2.23)$$

時間  $t=0$  の時の反応物の初期濃度を  $C_0$  として積分すると次式となる。図 2.3 に 0 次反応と 1 次反応の濃度変化を示す。

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (2.24)$$

また、A の濃度が半分になるのに要する時間を半減期といい、 $t=t_{1/2}$  で  $C=C_0/2$  を代入して次式のように表すことができる。

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k} \quad (2.25)$$

#### c. 連続反応

反応物 A → 中間生成物 B → 最終生成物 C のように連続して反応が生じ、それぞれの反応が不可逆な一次反応であると仮定すると、反応速度は式 (2.26) のように表すことができる。

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A, \quad \frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k'_1 C_B, \quad \frac{dC_C}{dt} = k'_1 C_B \quad (2.26)$$

ここで、 $k_1, k'_1$  は各々 A → B と B → C における一次反応速度定数である。時間  $t=0$  の時、A, B, C の濃度を  $C_0, 0, 0$  として積分すると式 (2.27) ~ 式 (2.29) となる。これらの式より、各成分濃度の時間的変化を見ることができる（図 2.4）。

$$C_A = C_0 e^{-k_1 t} \quad (2.27)$$

$$C_B = \frac{k_1 C_0 e^{-k_1 t}}{k'_1 - k_1} \left( e^{(k'_1 - k_1)t} - 1 \right) \quad (2.28)$$

$$C_C = C_0 \left( 1 - \frac{k'_1 e^{-k_1 t} - k_1 e^{-k_1 t}}{k'_1 - k_1} \right) \quad (2.29)$$

また、 $k'_1$  が  $k_1$  より非常に大きいとき ( $k'_1 \gg k_1$ )、 $C_C$  の式 (2.29) は  $C_C = C_0 (1 - e^{-k_1 t})$  となり、 $k'_1$

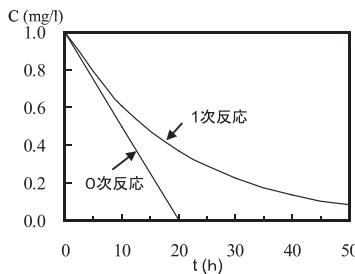
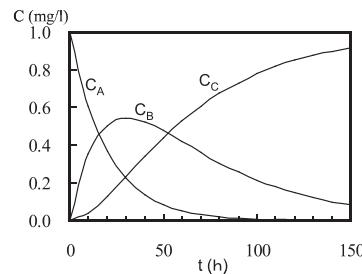


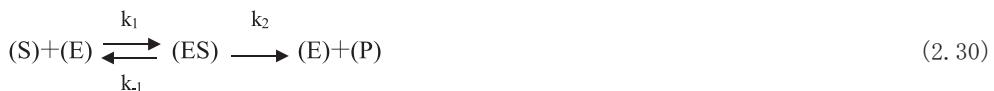
図 2.3 0 次反応と 1 次反応

 $(C_0=1\text{mg}/1, k=0.05\text{h}^{-1}$  の場合)図 2.4 連続反応 ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ) $(C_0=1\text{mg}/1, k_1=0.05\text{h}^{-1}, k_2=0.02\text{h}^{-1}$  の場合)

とは無関係となり  $A \rightarrow B$  の反応速度に支配される。全体の反応速度を支配する段階、すなわち、ある反応段階が他の段階よりも非常に遅く進行する段階がある場合、その段階を律速段階といいう。

### 2.1.8 酵素反応の速度

生体内での同化や異化の反応は、酵素の働きによって進行する。酵素の反応速度を表現する式として Michaelis-Menten (ミカエリス-メンテン) 式がよく利用されている。基質 (S) が酵素 (E) と反応して複合体 (ES) となり、これが生産物 (P) に分解される。k は反応速度定数である。



$$\frac{d(ES)}{dt} = k_1(E)(S) - k_{-1}(ES) - k_2(ES) \quad (2.31)$$

中間生成物が蓄積していない条件で生成物を得るとすると  $(d(ES)/dt=0)$ ,

$$k_{-1}(ES) + k_2(ES) = k_1(E)(S) \quad (2.32)$$

$$(ES) = \frac{k_1}{k_{-1} + k_2} (E)(S) \quad (2.33)$$

また、初期存在酵素量を  $(E_0)$  とすると、 $(E_0) = (E) + (ES)$  となり、

$$(ES) = \frac{k_1(S)}{k_{-1} + k_2} \{(E_0) - (ES)\} = \frac{(E_0)(S)}{\frac{k_{-1} + k_2}{k_1} + (S)} \quad (2.34)$$

生産物の生成速度 V は

$$V = k_2(ES) = \frac{k_2(E_0)(S)}{\frac{k_{-1} + k_2}{k_1} + (S)} \quad (2.35)$$

となる。ここで、 $V_{\max} = k_2(E_0)$ 、 $K_m = (k_{-1} + k_2)/k_1$  とすると、式 (2.36) のように書き換えることができる。

$$V = \frac{V_{\max}(S)}{K_m + (S)} \quad (2.36)$$

ここで、 $K_m$  は定数で、図 2.5 に示すように、 $S \ll K_m$  の場合の反応速度は基質濃度に依存し (一次反応)、 $S = K_m$  の場合は  $V_{\max}/2$  となり、 $S \gg K_m$  の場合は基質濃度には依存しない 0 次反応を示すことがわかる。

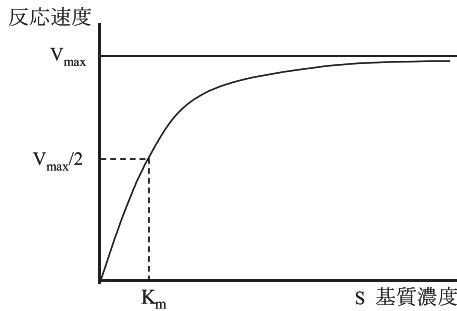


図 2.5 基質濃度と反応速度の関係

かる。 $V_{max}$  及び  $K_m$  を実験的に算定する場合は、式 (2.36) を式 (2.37) に書き換えて、Lineweaver-Burk plot (ラインウェーバーバルクプロット) の傾きと切片から求めることができる。

$$\frac{1}{V} = \frac{K_m + (S)}{V_{max}(S)} = \frac{K_m}{V_{max}} \frac{1}{(S)} + \frac{1}{V_{max}} \quad (2.37)$$

## 2.2 環境物理の基礎

### 2.2.1 希釈

水質は、単位水量当たりの物質量で表されることから、汚濁水に清澄な水を加えると希釈されて水質的には（濃度上は）きれいになる。対象物質が非反応性であれば、流量が  $Q_1$ 、水質が  $C_1$  の水と、流量が  $Q_2$ 、水質が  $C_2$  の水が完全に混合する場合は、流入する流量は  $(Q_1+Q_2)$ 、流入する物質量は  $(Q_1C_1+Q_2C_2)$  であり、平均水質  $C$  は式 (2.38) のように表現できる。

$$C = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_1 + Q_2} \quad (2.38)$$

仮に  $C_2=0$  であれば、濃度は混合前の  $Q_1/(Q_1+Q_2)$  倍となる。希釈により濃度は低下するが、水中に含まれる物質量は不変であることを理解する必要がある。例えば、汚濁物質を多量に含む工場廃水を多量の水で希釈して河川に排出した場合、希釈により濃度は低下するが、河川に及ぼす影響は同じである。ただし、閾値（しきいち）（無影響量）のある有害物質を含む場合には、希釈による濃度低下で有害影響がなくなる場合があり、希釈は有効な手段となる。

### 2.2.2 流れの理想モデル

水域や反応槽内にある物質は、流れや混合によって移動するが、その流れを表す両極端の代表的な理想モデルに押し出し流れと完全混合流れがある。押し出し流れは、図 2.6 に示すように、一方向に水が整然と流れ、ある地点 ( $t=0$ ) で流入した物質は、式 (2.39) の流下時間  $t$  を経過した移動地点でその全量が検出される。

$$t = AX/Q = V/Q \quad (2.39)$$

ここで、 $V$  は流路断面積  $A$  に流下距離  $X$  を乗じたものであり、 $Q$  は流量である。

完全混合流れは、物質が流入した瞬間にその水域内あるいは反応槽内で完全に均一に混合される流れである。物質収支は式 (2.40) のようになり、時間  $t=0$  の時の物質の初期濃度を  $C_0$  として積分すると式(2.41)となる。図 2.7 は押し出し流れと完全混合流れの物質濃度の変化を示したものである。

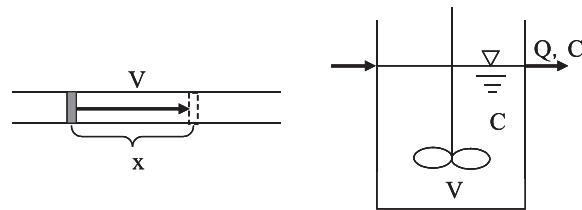


図 2.6 流れモデル（左：押し出し流れ、右：完全混合流れ）

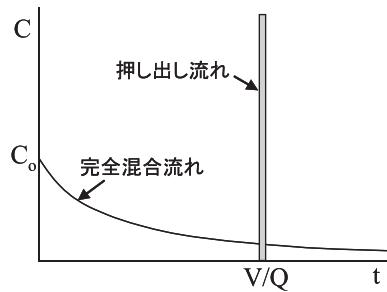


図 2.7 流れモデルの物質濃度の変化

$$V \frac{dC}{dt} = -QC \quad (2.40)$$

$$C = C_0 e^{-\frac{Qt}{V}} \quad (2.41)$$

### 2.2.3 移流、拡散

汚濁物質が川に流出した場合、汚濁物質は水の流れにのって移流によって運ばれていくとともに、濃いものが薄められていく、いわゆる拡散が生じる。このような現象を数式で表すことができれば、任意の時間や場所における水質濃度が予測でき、汚染物質が流出したときの環境保全対策に非常に有用である。まず簡単な場合として、拡散のみが生じる場合について考えてみると、物質の拡散現象は式 (2.42) に示す Fick の第 1 法則によって表される。

$$J = -D_L \frac{\partial C}{\partial X} \quad (2.42)$$

ここで、J は拡散による物質のフラックス ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )、 $D_L$  は拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) を表している。フラックスとは、単位面積を単位時間当たりに通過する物質量として定義される。 $\partial C / \partial X$  は X 方向の濃度 C の勾配を表しており、濃度 C が場所 X の関数だけではなく、時間 t の関数でもあるために偏微分になっている。すなわち Fick の第 1 法則は、拡散による物質移動のフラックスは濃度勾配に比例することを意味しており、隣接する場所との濃度差が大きいと拡散により多くの物質が移動するが、濃度差がないと拡散による物質移動は生じない。

このような拡散現象が生じているときに、図 2.8 に示すような水中のある微小な区域における物質収支を考えると次のように表すことができる。なお、ここでは区域内での生成量は無視する。

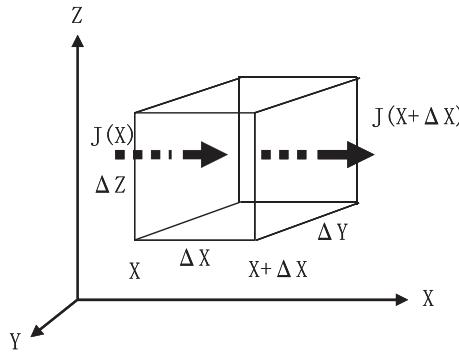


図 2.8 微小区域における物質収支

区域内の物質量の時間変化率 =

$$\text{区域に流入する物質量} - \text{区域から流出する物質量} \quad (2.43)$$

$$\Delta X \Delta Y \Delta Z \frac{\partial C}{\partial t} = J(X) \Delta Y \Delta Z - J(X + \Delta X) \Delta Y \Delta Z$$

式 (2.43) を整理すると,

$$\Delta X \frac{\partial C}{\partial t} = J(X) - J(X + \Delta X) \quad (2.44)$$

微分の定義を思い出すと,

$$\frac{\partial J}{\partial X} = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{J(X + \Delta X) - J(X)}{\Delta X} \quad (2.45)$$

なお、左辺が偏微分になっているのは、 $J$  が  $C$  と同様に  $X$  のみならず  $t$  の関数でもあるからである。いま、 $\Delta X$  はもともと微小量として考えているので、上式は次のように変形できる。

$$J(X + \Delta X) - J(X) = \Delta X \frac{\partial J}{\partial X} \quad (2.46)$$

式 (2.46) を式 (2.44) に代入して整理すると式 (2.47) が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial X} \quad (2.47)$$

式 (2.47) の  $J$  に Fick の第一法則を代入し、拡散係数が一定の場合には次式で表される Fick の第二法則が得られる。なお、 $D_L$  が分子拡散だけでなく、乱流（水粒子が不規則に入り乱れて流れる流れ）による拡散の影響も受ける場合には、 $D_L$  は流速の関数となり一定値にはならない。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( D_L \frac{\partial C}{\partial X} \right) = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (2.48)$$

次に、汚染物質が流出してから十分に時間が経過して定常状態になったとき（濃度の時間変化がなくなったとき）を考えると、式 (2.48) の左辺の濃度の時間変化率は 0 であるから、

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( D_L \frac{\partial C}{\partial X} \right) = 0 \quad (2.49)$$

さらに、両辺を  $X$  で積分すると、 $C_1$ 、 $C_2$  を定数として次式が得られる。

$$C = \frac{C_1}{D_L} X + C_2 \quad (2.50)$$